

[文章编号] 1003-4684(2024)02-0038-05

# 医用防护服粉碎装置设计

曹璞钰

(湖北工业大学机械工程学院,湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 为提升粉碎装置对医用防护服混合物的粉碎性能,需对粉碎装置进行优化设计。采用模块化设计与粉碎过程分析的方法,对医用防护服粉碎装置的动刀安装角度与刀架安装布局进行改进设计,使用 ADAMS 对优化前后的粉碎装置进行仿真模拟。结果表明:将粉碎动刀的安装角度由水平安装提升至与水平方向呈  $60.8^\circ$  的夹角后,粉碎装置对医用防护服的剪切力提升了 34%;动刀刀架以间隔  $15^\circ$  的方式进行布局,刀架工作时所受到的应力由 3960 N 下降至 660 N;对医用防护服混合物剪切时,优化后的单辊式粉碎机刀架布局角速度波动范围由  $625\sim 820^\circ/\text{s}$  降低至  $700\sim 800^\circ/\text{s}$ ,角加速度无明显波动,振动明显降低。

**[关键词]** 混合物料剪切;刀架排布;振动;剪切力

**[中图分类号]** TS152 **[文献标识码]** A

常见的医用防护服粉碎装置采用单辊式平刀刀架。此类刀架虽安装简单,成本较低,但对于薄膜类材料的粉碎效果较差,且对硬质物料粉碎时整体噪声较大。

相关学者对影响粉碎装置粉碎性能的参数进行了大量研究。贺宁波等<sup>[1]</sup>对秸秆粉碎机刀片角度进行了优化设计,对不同后角下刀片的剪切效果进行对比,得到后角角度提升时剪切效果更好的结果。刘春生等<sup>[2]</sup>对刀具在粉碎时所产生的振动与粉碎量进行了实验测试,发现振动下降与粉碎量提高呈非线性相关。邢志中等<sup>[3-5]</sup>使用离散元法对粉碎机刀具承受冲击力对刀具粉碎效果的影响进行了测试,结果显示随着冲击力的过程提升,刀具破碎粒度逐渐下降。乔冰等<sup>[6-7]</sup>采用不同类型物料对相同刀具的粉碎效果进行测试,结果发现在采用平式刀架布局时,需要将定刀与动刀的间隙降低至 0.1 mm 时装置才具备较好的粉碎效果。曹国忠等<sup>[8-9]</sup>将正向交叉粉碎机刀具进行了改进,采取了斜向交叉的方式,使粉碎刀具在同等时间内对纸张的粉碎效率提升了 14.6%,同时降低了漂浮碎纸屑产生。Zhao F 等<sup>[10-11]</sup>通过使用双对置刀头平刀方式,将平刀粉碎装置的整体粉碎效率提升了 12.2%。丁慧玲等<sup>[12-3]</sup>通过对刀具刃口的曲线参数优化与刀具位置调整,使粉碎装置提升了对脆性薄膜类材料的粉碎效果。综合上述研究,目前对单辊式平刀粉碎结构的研究集中于单一物料的粉碎,而在薄膜类材料中混杂硬

质物料的粉碎过程较为复杂,传统平刀结构对此类物料的粉碎效果较差。

为提高单辊式平刀粉碎结构对医用防护服混合物的整体粉碎效率,同时降低粉碎装置在粉碎时的振动。本文以提升刀具的剪切力与降低刀架运行时角速度波动为目标,通过分析刀片与刀架在粉碎时的受力情况,利用 ADAMS 软件进行仿真分析。

## 1 医用防护服材质特性

目前市面上常见的医用防护服种类主要为非织造医用防护服,其性质如表 1 所示。

表 1 常见医用防护服主要参数

名称	主要材料	厚度/mm
纺粘非织造医用防护服	聚丙烯(衣物), 聚碳酸酯(护目镜)	0.15
喷融非织造布 医用防护服	聚丙烯(衣物), 聚碳酸酯(护目镜)	0.15
SMS 非织造复合 医用防护服	聚丙烯(衣物), 聚碳酸酯(护目镜)	0.15

根据表 1 可知,常见医用防护的主要材料为聚丙烯喷融布以及聚碳酸酯护目镜。而常见聚丙烯喷融布厚度约为 0.15 mm 左右,为聚丙烯薄膜类材料,聚碳酸酯护目镜为硬质塑料。因此,医用防护服可视为软质聚丙烯薄膜与聚碳酸酯塑料混合物。

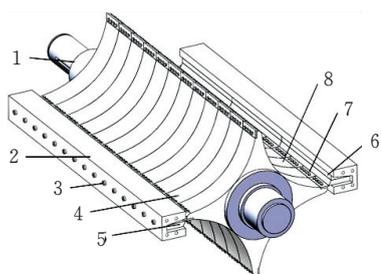
[收稿日期] 2022-06-07

[第一作者] 曹璞钰(1993-),男,湖北十堰人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为机械结构优化。

## 2 医用防护服粉碎过程

### 2.1 单辊式粉碎机刀架轴结构

医用防护服粉碎装置粉碎部分结构如图 1 所示, 主要由固定在机架上的定刀部分与旋转的动刀部分组成。定刀通过楔块 6 与固定螺钉 3 固定在定刀架上, 动刀则通过螺钉安装在动刀架 8 上。动刀架 8 与刀架轴 1 通过键连接, 粉碎时刀架轴旋转, 通过定刀与动刀的相对运动产生的剪切力实现物料的粉碎。实际使用中的医用防护服粉碎装置刀架参数见表 2。



1—刀架轴; 2—定刀架; 3—固定螺钉; 4—刀架;  
5—定刀片; 6—楔块; 7—动刀片; 8—刀架

图 1 单辊式粉碎机刀架轴结构

表 2 刀架参数 mm

	总长度	工作长度
刀架轴	870	620
定刀架	650	650
刀架	50	50
定刀片	600	600
动刀片	50	50

### 2.2 动刀运行轨迹分析

动刀在旋转至与定刀相接触时, 两刀片间会产生剪切作用, 此时刀片对医用防护服混合物进行粉碎作业, 其有效粉碎速度为沿刀片的 Y 轴方向的分速度  $v_y$ , 故粉碎作业仅需分析刀片在 Y 方向的速度。由于刀轴沿圆周做匀速运动, 对刀片的运动轨迹进行分析, 可以得到各速度关系。刀刃运动轨迹见图 2。

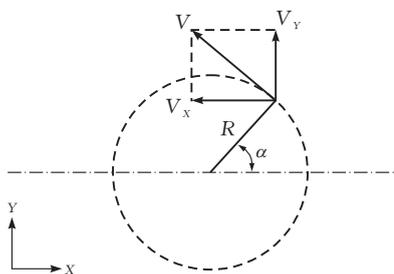


图 2 刀片速度分析

刀刃沿 X, Y 轴方向速度分量如下所示:

$$v_x = R\omega \cos \alpha = R\omega \cos at \quad (1)$$

$$v_y = -R\omega \sin \alpha = -R\omega \sin at \quad (2)$$

对刀片运行轨迹分析计算可得, 当刀架轴匀速旋转时, 刀刃沿 Y 方向分速度, 即对混合物的有效粉碎速度呈现负余弦三角函数变化。

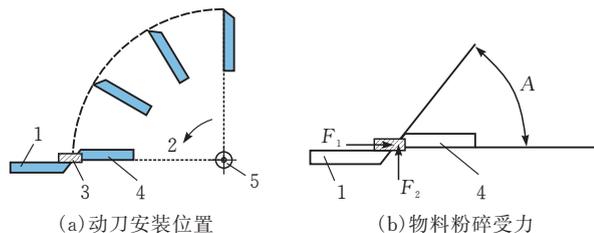
粉碎刀片沿 Y 轴方向加速度

$$a_y = \lim \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \frac{dv_y}{dt} = R\omega^2 \sin \omega t \quad (3)$$

Y 方向有效粉碎加速度呈现正弦三角函数变化。

### 2.3 刀片剪切原理

出于成本及加工难度考虑, 常见的单辊式粉碎机通常将定刀的水平面作为刀片的安装基准面(图 3a), 物料在两刀片间的被粉碎过程如图 3b 所示。



1—定刀; 2—动刀旋转方向; 3—物料; 4—动刀; 5—刀架轴

图 3 刀具剪切原理

当动刀与定刀刀片啮合时, 随着刀片间的间隙减小, 物料在水平方向上受到的挤压力  $F_1$  增大, 物料发生碎裂, 在竖直方向上的剪切应力  $F_2$  达到材料的屈服极限时, 物料被动刀剪断。

## 3 动刀剪切角改进

由于聚丙烯纤维具有很强的延展性与韧性, 随着动刀脱离定刀位置, 剪切力快速减小, 难以将混合物带离剪切位置。因此, 常规单辊式粉碎机的靠剪切力与挤压力对聚丙烯纤维混合物的切断效率较低。通过减少刀具的后角 A 可提升对薄膜类物料的剪切力, 但后角降低的同时刀具的强度也会降低, 在粉碎聚碳酸酯等硬质材料时会增大崩刀的风险<sup>[10]</sup>。在不降低刀强度的前提下, 为提高粉碎机对聚丙烯纤维的剪切效果, 将动刀的安装角度进行调整, 改进后的刀具角度如图 4 所示。

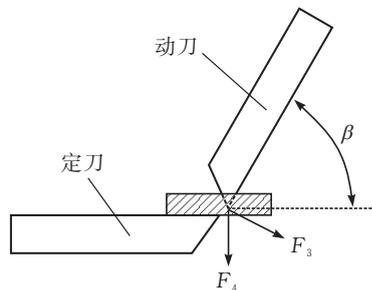


图 4 刀具角度

改进后的动刀安装角度与刀架轴侧面轴旋转一定角度, 使定刀与动刀本身形成一个剪切增强角  $\beta$ , 以提升动刀的剪切力。

动刀对聚丙烯混合物的挤压力

$$F_P = F_3 \times \cos \beta \quad (4)$$

刀片物料间的摩擦力

$$F_4 = f \times F_P \quad (5)$$

式中:  $F_P$  为动刀对混合物的挤压力;  $f$  为刀片与混合物的摩擦系数, 数值大小根据不同混合物的成分而改变。

由式(4)与式(5)可以得到动刀对物料的整体拉伸力

$$\begin{aligned} F_D &= F_3 + F_4 \times \sin \beta = F_b (f \cos \beta + \sin \beta) \\ &= F_b \sqrt{f^2 + 1} \sin(\beta + \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可得, 当  $\beta + \theta = 90^\circ$  (即  $\beta = \frac{\pi}{2} - \arctan \theta$ ) 时, 动刀对于聚丙烯混合物的拉伸力最大。参照聚丙烯塑料的粉碎案例<sup>[10]</sup>, 摩擦系数取 0.55。对式 6 进行求解可得, 当动刀与定刀夹角为  $60.8^\circ$  时, 剪切力相比于  $0^\circ$  时提升约 34%。

## 4 粉碎结构设计

### 4.1 粉碎装置振动原理分析

在对医用防护服粉碎过程中, 除医用防护服外, 医用防护服上所携带的护目镜等硬质部分也会进入粉碎装置中。护目镜所使用的聚碳酸酯使其具有硬质高分子混合物的特性。动刀剪切到护目镜时, 受剪切的护目镜的分子链发生延伸, 护目镜上下部分发生蠕变和延伸断裂。护目镜与刀刃的剪切部分与未受到剪切的部位产生了应力差, 通过这种应力差将其他未剪切部分也拖入运动中, 促使护目镜整体移动, 这部分的扰动通过由远及近的传播扩大了影响, 而这种传播现象被称为应力波。应力波会导致粉碎装置在工作时整体震动增大, 噪音提升, 这也是粉碎装置的主要振动与噪声来源<sup>[11]</sup>。聚碳酸酯护目镜剪切模型如图 5 所示。

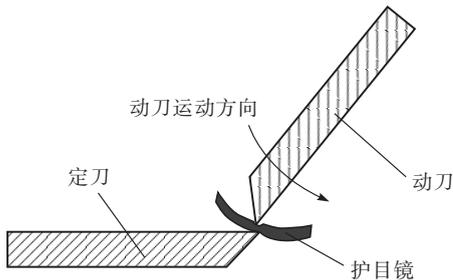


图 5 护目镜剪切模型

刀刃在与护目镜发生剪切作用时, 陡增的剪切应力使刀架轴转速急剧下降, 而护目镜并非均匀地分布在粉碎混合物中, 因此这部分陡增的剪切应力以脉动波形式出现。当皮带轮为刀架轴传递力矩时, 为补偿额外的剪切应力, 速度会下降, 因此整

个刀架轴的运转速度是变速旋转运动, 刀架轴在进行粉碎时所承受的弯曲应力为高频交变弯曲应力。若刀架轴运转时速度变化频率较高, 会增大工作时的振动并产生噪声, 因此降低刀架轴的振动可以显著降低设备的总体运行噪音。

### 4.2 平刀结构

本文所参考医用防护服粉碎装置的粉碎机刀架刀型为平刀结构如图 6 所示。

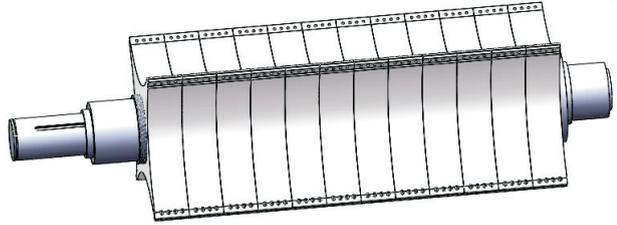


图 6 平刀结构模型

由于平刀刀架轴为不规则几何体, 难以通过公式直接对转动惯量与动能进行求解。因此选用 Solidworks 软件的质量属性模块, 将平刀刀架轴的模型导入, 进行求解, 最终得到刀架轴的转动惯量为  $125.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ 。

根据因定刚体的转动惯量

$$I = \frac{1}{2} m R^2 \quad (7)$$

对转动惯量进行微分求解:

$$dI = \frac{1}{2} dm dR^2 = R dm dR \quad (8)$$

对转动动能  $E_K$  进行微分求解:

$$dE_K = \frac{1}{2} dm d v^2 = \frac{1}{2} R \omega^2 dm dR \quad (9)$$

对式(8)与式(9)进行推导可得:

$$dE_K = \omega^2 dI \quad (10)$$

$$E_K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (11)$$

式中:  $m$  为质量,  $R$  为质点与转轴半径,  $\omega$  为刚体角速度,  $E_K$  为刚体的转动动能, 其值与几何体的形状无关。由式(11)计算刀架轴的转动动能为  $20.16 \text{ J}$ 。由实验测得, 用平刀对厚度  $1 \sim 5 \text{ mm}$  的硬质塑料粉碎时的剪切力大小为  $120 \sim 947 \text{ N}$ , 护目镜平均厚度约为  $2 \text{ mm}$ , 因此最大剪切力可取  $330 \text{ N}$ 。刀架上均布 4 排刀刃, 刀刃对物料进行间歇性剪切, 因此刀架轴的力矩也呈现间歇性波动, 每个间歇的周期为  $0.06 \text{ s}$ 。极限情况下每组刀架上都受到护目镜剪切力冲击, 此时刀片最大剪切力为  $3960 \text{ N}$ , 剪切一次做功为  $304.7 \text{ J}$ , 大于刀架转动所需的动能, 因此平刀结构在工作时的振动较大。

### 4.3 螺旋刀结构

单辊式粉碎装置除平刀结构外, 还有螺旋刀结

构。其结构如图 7 所示。

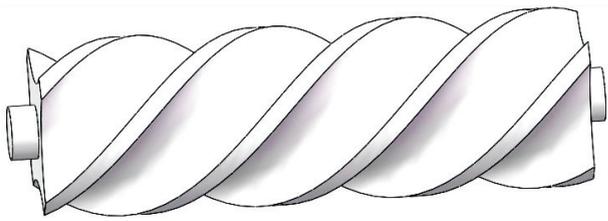


图 7 螺旋刀结构模型

螺旋刀在剪切时是逐点剪切，剪切力的峰值低，变化平稳，因此所产生的振动与噪声较低。螺旋刀的剪切力模型见图 8。

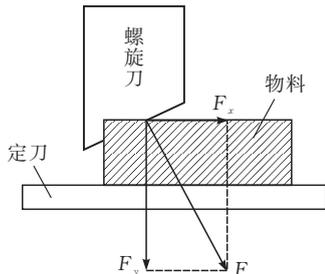


图 8 螺旋刀切割

刀在对物料剪切时刀片对物料施加沿着 X 轴方向的力  $F_x$ ，同时切刀受到沿 Y 方向的挤压力。这组复合力的作用会通过刀架支撑轴承的轴向方向施加挤压力，加速了支撑轴承的损耗。

由于螺旋刀加工工艺复杂，在工作时若碰到石子等坚硬杂物会产生崩刃，维修时无法对崩刃部分进行修复或者更换，需对整个刀架进行更换，成本较高。

#### 4.4 螺旋平刀改进方案

通过结合平刀与螺旋刀的优点部分，对平刀方案进行改进，改进后方案如图 9 所示。

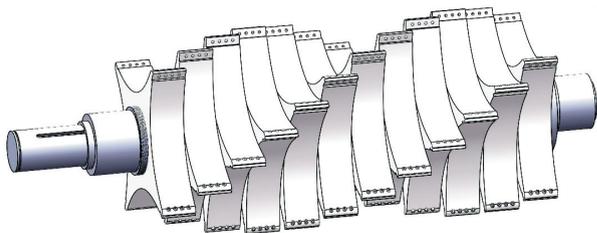


图 9 螺旋平刀布局方案

该方案将传统的平刀刀架沿一个剪切周期平均分布，单个剪切周期的角度为  $90^\circ$ ，一个剪切周期均分 6 次。相比于传统平刀方案，单次剪切的峰值由 12 刀架变为 2 刀架，剪切力峰值降低为原来的  $1/6$ ，剪切力峰值由 3960 N 降低为 660 N，极大降低了设备运行时的噪声与振动。刀架与刀片间仍然采用模块化方案，降低了维护成本。

## 5 粉碎装置粉碎过程仿真

为验证刀架布局优化的合理性，对优化后的刀架布局进行动力学仿真，对螺旋平刀布局与平刀布局在工作时的振动大小进行对比。

图 10 为仿真分析模型。考虑到仿真分析为粉碎装置振动仿真，仅保留粉碎装置本体及传动系统。仿真模型参数见表 3。

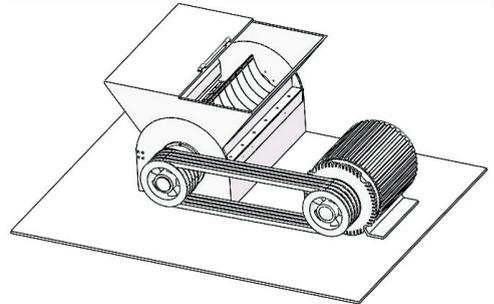


图 10 仿真分析模型

表 3 运动学仿真模型参数

名称	参数
刀架长度/mm	870
粉碎室长度/mm	640
刀架宽度/mm	50
电机与刀架轴传动比	1:1
电机转速/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$	1000

传动系统部分将 2:1 传动比简化至 1:1 传动比，粉碎装置本体去除了上盖等其他附加构件，仅保留粉碎相关部分。粉碎室总长度为 640 mm，其中刀架轴长度为 870 mm，半径 50 mm，刀架宽度为 50 mm，刀架半径为 150 mm，皮带轮半径为 100 mm。

将模型保存为 parasolid 格式并导入 ADAMS。材料部分，刀架轴设置采用 40Cr 作为材料，将密度设置为  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ；机架部分设置为普通结构钢。对刀架及刀架轴的 Y 轴方向添加力以代替重力，将机架固定，在粉碎装置皮带轮处添加转动副，将皮带轮与刀架轴配合，刀架轴与刀架配合，将转速设置为  $1000^\circ/s$ 。对动刀方向施加间歇向 Z 方向的力，与刀架方向剪切运动一致。仿真进行 2 次。2 次仿真模型仅更换刀架，最终取稳定运行后 12 s 内刀架轴的角速度与角加速度的变化图。仿真所得结果对比见图 11、图 12。

对比角速度仿真结果可见，在优化刀架结构前，刀架轴的角速度范围控制在  $625 \sim 820^\circ/s$  范围内。在整个仿真过程中，有数次较大的角速度波动，波动峰值达到约  $1600^\circ/s$ ，优化后刀架布局将角速度控制在  $700 \sim 800^\circ/s$ ，且全程无较大角速度

波动。

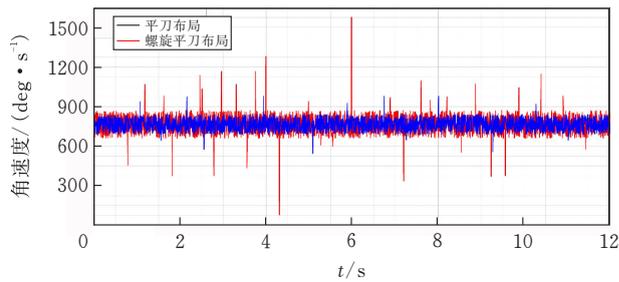


图 11 角速度对比

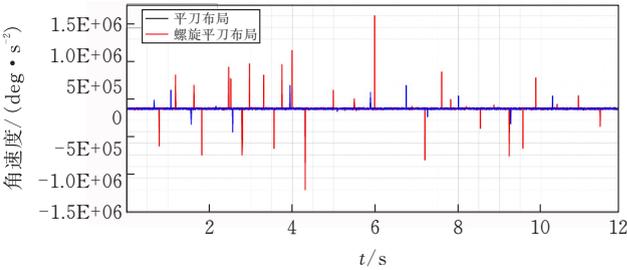


图 12 角加速度对比

对比角加速度结果,平刀布局在整个运行过程中角加速度波动较大。优化后的螺旋平刀布局在整个运行过程中角加速度更为平稳,无较大波动。

根据仿真结果分析,由图 11 与图 12 可明显看出,由于粉碎时物料的位置不稳定,整个粉碎过程角速度无法保持均匀,会产生瞬时波动,优化后的刀架布局在工作时整个角速度波动范围更小,同时不会产生瞬间波动,表明设备工作时振动更小。

## 6 结论

采用模块化设计与粉碎过程分析的方法,将粉碎装置传统的平刀刀架设计改为螺旋布局的平刀刀架,同时增加了刀片剪切角度。刀具剪切角度由原本的水平方式变为与水平方向呈  $60.8^\circ$  夹角。刀具安装角度增加后,剪切力提升了 34%,在切断医用防护服后,具备剪切角度的动刀可将医用防护服由原本位置带离,避免了传统平刀刀架剪切装置在剪切后物料粘连刀具的状态,提升了剪切效果。

刀架采用以  $15^\circ$  间隔螺旋排布,刀具在运转时的瞬时剪切力峰值减小。通过与传统平刀刀架的对比仿真实验可得,采用螺旋平刀排布的刀架在工作时角速度波动范围更小,运转更为平稳,整体振动更小,工作载荷明显下降。本设计的粉碎装置运行噪音较小,相比普通粉碎装置粉碎效果有所提升,设计具有实际使用价值。

优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 85-91.

- [2] 刘春生,袁昊,李德根. 碟盘刀具轴向振动破碎煤岩载荷模拟与粉碎量研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(01):189-195.
- [3] 邢志中,郭卫,张武刚,等. 基于离散元法的粉碎机冲击力测试[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(06): 1041-1048.
- [4] TRAN T H, GIANG T N, NGO N V, et al. Optimizing dressing conditions for minimum flatness tolerance when grinding SKD11 tool steel[J]. Materials Science Forum, 2021, 1020:83-90.
- [5] 杨新顺,程改兰,任天乐,等. 基于离散元法的大豆饲料粉碎机刀具材料对粉碎效果的分析与研究[J]. 饲料研究, 2019, 42(08):87-91.
- [6] 乔冰. 秸秆粉碎颗粒成型一体机刀具的设计与分析[J]. 冶金管理, 2022(03):52-54.
- [7] WHITMORE L. A precision manual grinding tool for sample preparation.[J]. Ultramicroscopy, 2021, 233: 113 436
- [8] 黄冬明,范秀敏,武殿梁,等. 挤压类破碎机破碎产品粒度分析[J]. 机械工程学报, 2008(05):201-207.
- [9] 曹国忠,刘孟然,万子薇. 基于进化树的碎纸机刀具变型设计[J]. 机械设计, 2019, 36(10):121-126.
- [10] ZHAO F, WANG H, SHEN P, et al. Numerical experiment rock fragmentation by combined dynamic and static loads under dual-cutter head [J]. Engineering Sciences, 2012.
- [11] BELLIZZI S, MURGIA P, ANGIOI A, et al. Severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 medical solid waste treatment: A need for efficient and effective strategies in low-resourced settings[J]. Waste Management & Research, 2021, 39.
- [12] 丁慧玲,党风魁,师清翔,等. 玉米根茬破碎刀具刃口曲线参数与运动参数的关系[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2010, 31(04):75-77.
- [13] THAKUR A K, SATHYAMURTHY R, VELRAJ R, et al. A novel solar absorber using activated carbon nanoparticles synthesized from bio-waste for the performance improvement of solar desalination unit[J]. Desalination, 2022, 527(5):115 564.
- [14] CAESARENDRA W, PANDIYAN V, TJAHO-WIDODO T, et al. A CNN prediction method for belt grinding tool wear in a polishing process utilizing 3-axes force and vibration data[J]. Electronics, 2021, 10(12):1429.

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 贺宁波,李粤,郭超凡,等. 香蕉秸秆粉碎还田机刀片

(下转第 52 页)